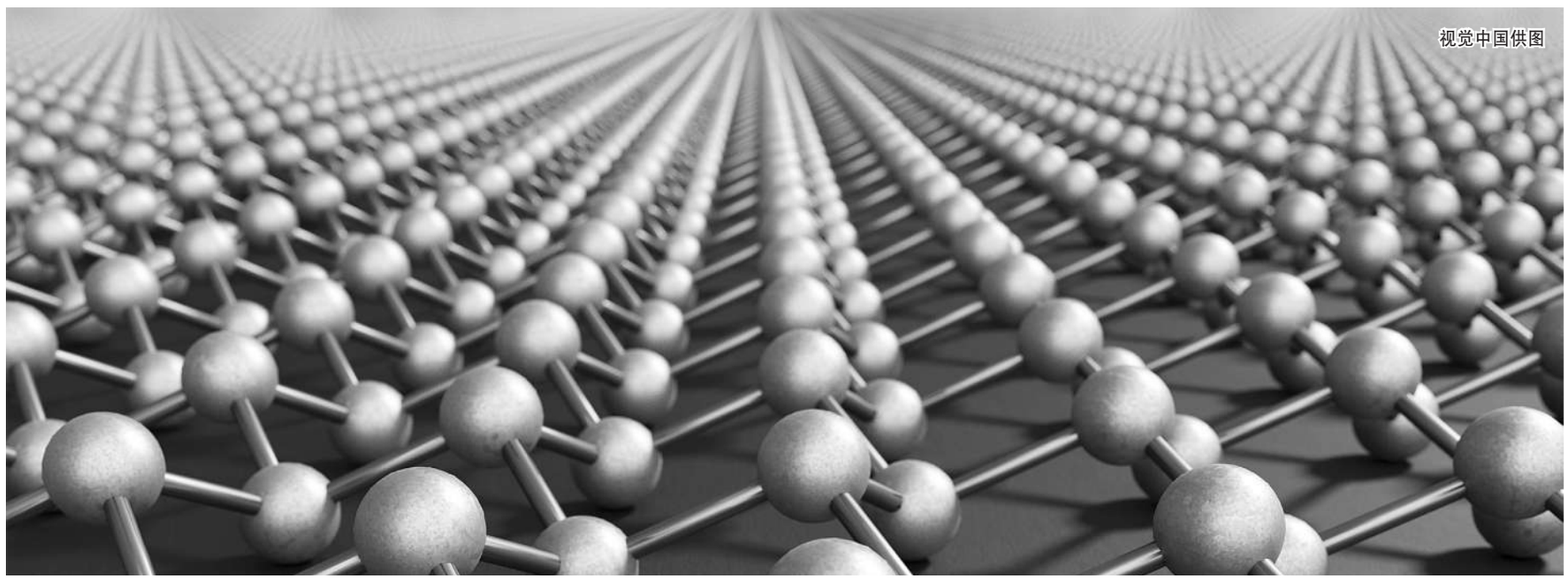

视觉中国供图

10特斯拉二极磁场下实现超零场环境80%高载流性能

我国铁基超导材料向高磁场应用迈进

◎本报记者 陆成宽

2月22日，科技日报记者从中国科学院高能物理研究所（以下简称高能所）获悉，国际学术期刊《超导科技》发表我国科研人员的一项有关铁基高温超导的最新成果。

来自高能所和中国科学院电工研究所（以下简称电工所）的研究人员，基于百米铁基超导带材研制的长尺度跑道型线圈，在10特斯拉二极磁场下，实现超过零场环境80%的高载流性能，首次验证了大尺寸铁基超导线圈在高磁场领域应用的可行性，及其载流性能对背景场强相对不敏感的高场应用优越性。

这是继2016年研制出首根百米级铁基超导带材、2019年完成小尺寸铁基超导螺线管线圈24特斯拉性能验证后，该团队取得的又一重要进展。

超导材料要实现强电高磁场应用，必须解决限制线材性能的微观机理问题，突破其关键制备技术，从而获得高磁场下高临界电流、高机械强度以及较好的电磁稳定性等特性。

马衍伟
中国科学院电工研究所研究员

中国科学家走在铁基高温超导研究最前沿

所谓超导，是指某些材料在温度降低到某一临界温度以下时，电阻突然消失的现象。具备这种特性的材料称为超导材料。超导材料的两个基本性质是零电阻和完全抗磁性，这些不寻常的特性使其在科学研究、信息通讯、能源存储、交通运输、生物医学等领域均有重大的应用前景。

1968年，美国物理学家麦克米兰根据传统理论计算推断，超导材料的转变温度一般不能超过40开尔文（1开尔文约为-273℃），这个温度也被称为麦克米兰极限温度。1986年，两名欧洲科学家发现了以铜为关键组成元素的铜氧化物超导体，很快包括中国科学家在内的研究团队将铜氧化物超导体的临界转变温度提高到液氮温区以上，突破了麦克米兰极限温度，学界将其称为铜基高温超导材料。

铜基高温超导材料作为一类金属陶瓷材料，加工工艺严苛，综合成本相对较高。2008年2月，日本化学家细野在四方层状的铁砷化合物中发现存在转变温度为26开尔文的超导性，但因为没有突破麦克米兰极限温度，还不能确定该材料是否为高温超导材料。

我国科学家基于在此领域长期的研究经验，敏锐地意识到，类似结构的铁砷化合物中很可能存在更高超导转变温度。2008年3月，中国科学技术大学陈仙辉研究组和中国科学院物理研究所（以下简称物理所）王楠林研究组同时在铁基中观测到了43开尔文和41开尔文的超导转变温度，突破了麦克米兰极限温度，证明了铁基超导材料为高温超导材料；随后，物理所赵忠贤研究组利用高压合成技术高效地制备了一大批不同元素构成的铁基超导材料，并创造了55开尔文的铁基超导体转变温度纪录。

目前，我国科学家走在了铁基超导材料研究国际最前沿。“之前的超导理论认为超导性和铁磁性不能共存，而铁基超导材料的发现表明高温超导机理研究还存在巨大的未知空间。”高能所研究员徐庆金说。

铁基超导材料实用化正“爬坡过坎”

经国际物理学界认可，铁基超导材料正式成为新一类高温超导材料。更重要的是，铁基超导材料还具有临界磁场高、各向异性小、晶界临界角大等一系列有利于实用化的优点。

从铁基超导材料具有的优点看，它在中低温高磁场领域具有较大的应用潜力，可充分发挥其临界磁场高、各向异性小、制备成本低等优势。比如，基于铁基超导材料制备的高场超导磁体，有望大幅度提升磁体性能，降低目前高场磁体高昂的造价，在医疗核磁共振谱仪、先进能源、基础科学研究装置，以及电力及交通等领域具有重要的应用前景。

然而，“超导材料要实现强电高磁场应用，必须解决限制线材性能的微观机理问题，突破其关键制备技术，从而获得高磁场下高临界电流、高机械强度以及较好的电磁稳定性等特性。”电工所研究员马衍伟说。

2016年，电工所率先制备了百米量级的铁基超导线材，为铁基超导材料的实用化开启了大门。2018年，高能所和电工所合作，基于超导带材短样研制出铁基超导内插螺线管线圈，成功在24特斯拉的强磁场下获得较高临界电流，用实验验证了铁基超导材料高场应用的可行性，2020年中国科学院强磁场中心在高达30特斯拉的强磁场背景下的测试进一步验证了此结果。

与此同时，高能所和电工所合作团队也开始了基于百米级铁基超导带材大尺寸超导线圈的研制及高场性能测试，目前最高10特斯拉二极背景场下的测试结果表明：铁基超导线圈载流性能相对零磁场下损失小于20%，在高场下应用具有其独特的优越性。

可应用于下一代粒子加速器

“目前我们已经在高性能铁基超导线材方面获得较大进展，但相对来说，实用化铁基超导线材研究时间还很短，线材性能上还存在较大提升空间，制备工艺上也需要时间来进一步摸索优化的结构及参数。”徐庆金说。“本次成功验证大尺寸铁基超导线圈在高场领域应用的可行性，及其载流性能对背景场强相对不敏感的高场应用优越性，确实是一个很鼓舞人心的结果，证明研究团队从几年前开始推动的这项研究大方向没有错，也是科研团队通力合作的结果。”

同时，这项研究得到了国际同行的高度评价。审稿人如此评价此项工作的重要意义：“这一新成果将对超导材料及磁体技术领域产生重要影响”“证明了铁基超导材料用于发展下一代粒子加速器的巨大潜力”。

“未来进展顺利的话，铁基超导材料有望对下一代粒子加速器的发展产生重要影响，让新一代高性能、低成本的高场超导磁体从理想变为现实，助力相关的基础科学、高科技产业及人民健康的高质量发展。但是，目前的结果还只是阶段性进展。”马衍伟强调。

徐庆金表示，研究团队未来将在此基础上，继续大幅度提升铁基超导线带材的载流及机械性能，推进高性能铁基超导高场磁体技术的进一步探索及示范验证。性价比大幅度提升的新一代高场超导磁体技术，不仅可以推动高性能粒子加速器及可控核聚变等大科学装置的建设及相关基础科学的发展，在能源、医疗、电力、交通等民生领域也将有着广泛的应用。

用稀土超分子笼捕捉环境污染物

◎李宝乐 本报记者 张景阳

长期以来，废水、废气的排放一直是诸多环境问题中的焦点，其中有机物小分子、重金属离子及挥发胺等污染物已严重威胁到环境及人身健康，及时检测发现并预防污染物向环境中扩散成为当务之急。

科技日报记者2月21日从包头市稀土高新区获悉，“稀土超分子传感材料产业技术开发”项目正式实施。该项目将有效推动我国稀土功能材料应用技术研究开发，进一步拓展北方稀土产业链。“基于这样一种目的，我们将研发制备高灵敏和高选择性污染物传感器。”项目工程师、黑龙江大学教授李洪峰告诉记者。

稀土传感材料存在痛点

“在现有多种检测污染物的方法中，基于荧光的化学检测方法相比于其他检测方法具有更多优势，比如，操作简单、成本低廉和测试结果可靠等。荧光传感器以其灵敏度高、选择性好等优点已成为传感器领域的主要研究对象之一。但是，寻找到合适的材料构筑实用化的荧光传感器仍然面临诸多挑战。”项目负责人、包头稀土研究院高级工程师李静雅向记者介绍说。

据李洪峰介绍，稀土离子独特的电子层结构使稀土基配合物具有发射谱带较窄、色纯度高、荧光寿命较长和斯托克斯位移大等优点。这些优点可以有效克服来源于检测体系背景荧光的干扰，提高检测的灵敏度和精确度。但因要同时兼顾材料的渗透性、器件的制造工艺和性能，构筑稀土基传感材料仍面临着技术难题，因此关于稀土基配合物作为污染物检测传感器的开发较少。

发挥好传感性能，需要材料具有一定的孔隙率。然而，稀土离子较大的配位数往往会导致材料形成致密聚集体。通俗地讲，就是稀土金属有机框架虽然具有多孔和明确的通道，但其通道内的溶剂分子通常会阻碍目标分子进入，并因此导致它们与识别位点的相互作用受到限制；而若去除溶剂分子则会导致框架的崩溃。此外，较差的溶解度也让将材料制成传感器薄膜的成型难度加大。

对此，李静雅表示：“一方面传感器薄膜要容易成型，另一方面要让污染物自由进出薄膜，与薄膜内化学物质充分作用，并利用荧光强度的变化来定性和定量污染物的种类和含量，这是摆在我们面前的技术难题，很少有研究人员在这方面取得突破。”

创新材料操作简单结果可靠

在研发过程中，研发团队的灵感来源于生物酶的超分子结构，其空间的专一选择性和高效的催化性能来自于特定的识别位点和空间的限域效应。

项目团队前期在实验室以三苯胺衍生物作为面式配体，以稀土铕离子为顶点，构筑了一种具有空穴结构的稀土四面体笼超分子材料（即稀土超分子笼），该稀土超分子材料具有较好的溶解性，可以用旋涂方法制备成薄膜。

随后，技术人员结合稀土超分子笼的空间选择性、渗透性和稀土离子的特殊光谱特征，研究开发出一类新型稀土超分子材料并将其制成薄膜用于检测有机物小分子、重金属离子及挥发胺。“我们制备的稀土超分子薄膜可以弥补荧光传感不能有效对有机物小分子、重金属离子及挥发胺进行探测的问题。”李静雅说。

为了进一步检测薄膜的一些化学特性，项目研发团队还就薄膜对各种不同浓度胺/NH_3气体的荧光响应及检测限进行了深入研究。

技术人员将不同浓度的NH_3、丙胺、二丙胺、三丙胺、苄胺、苯乙胺、苯胺等气体送入装有稀土超分子薄膜的测试装置中，让稀土超分子薄膜与胺/NH_3气体充分作用后，测定荧光强度随胺/NH_3浓度变化的曲线。随后又对稀土超分子薄膜的荧光强度增加率与各种胺浓度的关系进行了研究，发现对胺类物质的检测限达到微克级。

所谓检测限，是指某一分析方法在给定的可靠程度内可以从样品中检测待测物质的最小浓度或最小量，这个微克级的检测限远低于大多数的胺类物质荧光检测器，可谓十分经济环保。

研发团队通过实验得知，该稀土超分子材料薄膜对胺类物质的响应时间为亚秒级并对胺类物质的测试具有可逆性，这一特征说明稀土超分子材料薄膜具有良好的光稳定性和化学稳定性，其在荧光传感方面具有较强的应用性。

“本项目将开发出一种新型的稀土超分子传感材料，基于该材料所制得的薄膜可用于检测废水废气中的有机物小分子、重金属离子及挥发胺，能及时预防污染物向环境中扩散，该技术应用操作简单，结果可靠，对提升稀土产品的附加值意义重大。”李静雅说。

长时间变形或拉伸后也能自我修复

“仿真肌肉”或打造现实版阿丽塔

◎洪恒飞 本报记者 江 耘

在科幻电影《阿丽塔：战斗天使》中，主角阿丽塔的全身由可拉伸电子器件组装而成，质地柔软且具备各种监测和感受功能。其关键组件弹性基体，能使电子器件在大幅度变形后不影响电学性能，同时实时传感外界刺激。此类可拉伸电子器件被学界视作未来仿真机器人以及人体假肢领域的重要组成部分。

科技日报记者2月21日从中国科学院宁波材料技术与工程研究所获悉，该所朱锦研究员团队开发了一种兼备超强韧、热修复以及自愈合性能的新型聚氨酯（DA-PU）材料，适合用作可拉伸电子产品的弹性基体，确保电子器件在复杂环境下仍能稳定工作，为柔性电子器件的基体开发和应用提供了研究思路和新视角。相关研究论文发表于《先进功能材料》。

历时两年合成，新材料兼具韧性和自愈合性能

“作为柔性电子领域的新一代技术，可拉伸电子器件具备更加出色的变形和传感能力。”论文第一作者应邬彬副研究员介绍，整个可拉伸电子器件的力学性能由弹性基体来承载，且其质量占比高达80%以上。目前常用的聚合物弹性基体材料有聚氨酯、硅基橡胶、水凝胶以及苯乙烯基橡胶等。

机械假肢、贴身动作监测器、各式可穿戴设备……由于可拉伸电子器件面对的应用环境复杂多样，人们希望高分子弹性基体在力学强韧的基础上，拥有人类皮肤的自愈合功能，从而提高可拉伸电子器件的耐用性和工作稳定性。

目前，在世界范围内，已有科研团队成功开发了多种自愈合弹性基体，但是兼顾力学性能和自愈合性能仍旧是个业界难题。

“如果弹性基体产生破裂或者完全撕裂，那整个电子器件将会直接失去作用，损失非常大。”应邬彬解释道，大部分弹性基体的分子链结构较为单一，进而限制了其功能单元的引入和自愈合功能的实现。同时，自愈合功能单元大多为动态键，对于普通的化学键来说键能较低，会降低原先分子链结构的结合强度和聚集形态，从而对力学性能产生不利影响。

“我们选择具有可逆动态自组装功能的基团，将其导入聚氨酯中。”应邬彬介绍说，此类基团不仅能够进行自组装交换，还具有相对较强的结合力，这就是兼具韧性和自愈合性能的关键。

“此外，拥有自组装效应的基团即使被外力分开，也能通过加热促使其快速运动，最终找到自己的‘另一半’进行再次组装，从而实现和肌肉一样的热修复。”据应邬彬介绍，团队从肌肉生理功能获得启发，历时两年合成了一种主链上电子供体和电子受体基团交替分布的聚氨酯，实现了分子链内和链间的供体与受体自组装，使其具有韧性以及自愈合性能。

1分钟

即使在较大的应变变形或长时间拉伸的情况下，经过60℃的热修复，新型聚氨酯也能在一分钟内基本恢复到原始长度。

工艺难点尚存，产业化步伐亟须加快

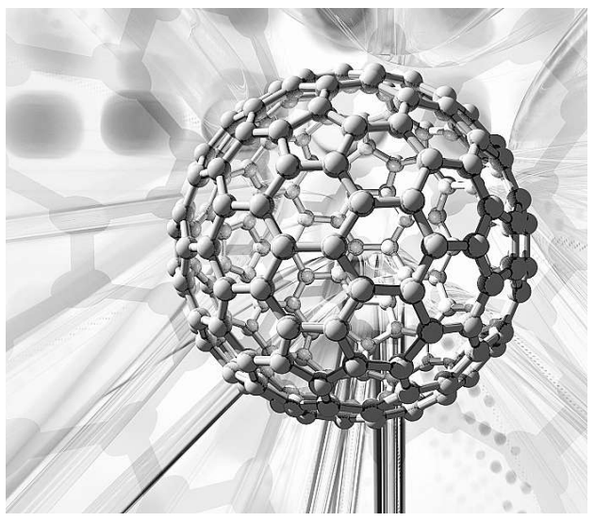
研究团队经过上百次的实验测得，新合成的聚氨酯具有高达1900%的断裂伸长率，以及强大的韧性。同时，此类聚氨酯还具有优异的自愈合性能，即使中间部分被完全切开，也能够逐渐实现自我修复，其力学性能还会随着时间的推移而增加，并最终恢复到原始韧性的97%。

“即使在较大的应变变形或长时间拉伸的情况下，经过60℃的热修复，新型聚氨酯也能在一分钟内基本恢复到原始长度。”应邬彬介绍道，这一“仿真肌肉”的合成，为可拉伸电子器件提供了更多应用场景，例如需要大应变的贴身动作监测器、破损情况较多的户外运动监测器等。团队趁热打铁，历时半年制备出了一种可拉伸、自愈合的电容式传感器。

谈及相关成果的产业化，应邬彬告诉记者，由于该基体的制备需要在惰性气体下进行，成本较高，目前只局限于实验室中的制备。

应邬彬表示，从弹性基体到可拉伸电子器件的制备转化，已经在许多实验室里得以实现，但还存在诸多工艺难点，比如接口问题、程序设计难等，大多都是小规模的制备，因此可拉伸电子器件目前几乎没有成熟的商业产品出现。实现工业转化还需时间。

“我们团队一直致力于高分子材料的研发和应用，无论在基础研究还是技术开发方面都有一定的积累，目前也在积极开发相关的产业化工艺。”应邬彬说，相信在不久的将来，人体假肢等领域将会率先出现以可拉伸电子器件为基础的产品，阿丽塔的手臂将成为现实。


视觉中国供图